

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J1905239

一种基于变权重的六足机器人共享遥操作控制*

尤波¹, 陈翰南¹, 李佳钰¹, 丁亮², 高海波²

- (1. 哈尔滨理工大学机电控制及自动化技术研究所 哈尔滨 150080;
2. 哈尔滨工业大学机器人技术与系统国家重点实验室 哈尔滨 150080)

摘要:针对复杂地形环境下的六足机器人步行操作任务,提出一种兼顾机器人行走效率以及稳定裕度的协同调控策略。该策略以现有的速度-位姿协同遥操作构架为基础,融入了共享控制策略,改善系统的操作性和协调性。该方法通过引入优势因子作为主端操作者对机器人的速度层与位姿层操作子系统的控制权重,通过以稳定裕度为输入的模糊推理器求出优势因子,将优势因子引入主从端控制器,主端机器人通过产生触觉力引导操作者进行控制指令的迭代。通过 Vortex 半物理仿真平台和操作手柄搭建的实验平台对本方法进行验证,并与传统的协同操控方式对比。实验结果表明,通过本策略对六足机器人进行操作能够在保证稳定裕度的同时合理地对机器人速度与位姿进行调控。

关键词: 六足机器人;遥操作;稳定裕度;共享控制;优势因子

中图分类号: TP24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.30

Shared teleoperation control of hexapod robot based on variable weight

You Bo¹, Chen Hannan¹, Li Jiayu¹, Ding Liang², Gao Haibo²

(1. Research Institute of Mechatronic Control and Automation Technology, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China; 2. State Key Laboratory of Robotics and System, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: Aiming at the walking operation task of hexapod robot in complex terrain environment, a cooperative control strategy both considering the walking efficiency and stability margin of the robot is proposed. Based on the existing velocity-posture cooperative teleoperation framework, the strategy incorporates the shared control strategy to improve the maneuverability and coordination ability of the control system. The method introduces dominance factor as the control weight, which makes the master operator have different control weights on the speed layer and posture layer operation subsystems of the robot. The dominance factor is obtained using the fuzzy reasoner that takes the stability margin as its input. The dominance factor is introduced into the master slave controllers, and the master robot guides the operator to iterate the control instructions through generating haptic force. The Vortex semi-physical simulation platform and the experiment platform built with operating handles are used to verify the proposed method and the method is compared with traditional cooperative control mode. The experiment results show that operating the hexapod robot with the proposed strategy can reasonably control the speed and posture of the robot while ensuring the stability margin.

Keywords: hexapod robot; teleoperation; stability margin; shared control; dominance factor

0 引言

近年来,随着足式机器人步行技术日趋成熟,其在勘探、救援、反恐等诸多领域具有广泛的应用^[1]。在执行此

类任务时,机器人所面对的工况条件存在着诸多的未知因素,势必会限制其运动性能及控制能力的充分发挥^[2],因此通常采用遥操作的方式改善足式机器人的运动性能,使其能够更好的完成所指定的特殊任务^[3]。采用常规的单主单从(SMSS)遥操作控制构架^[4-5]操作足式

收稿日期:2019-06-06 Received Date:2019-06-06

* 基金项目:国家自然科学基金(51575120)、哈尔滨市科技创新人才项目(2015RAXXJ007)、哈尔滨市杰出青年人才项目(2014RFYXJ001)资助

机器人在复杂环境下运动时, 操作者只能对机器人单一自由度进行控制, 机器人受到地形等因素的扰动后, 系统的跟踪性降低, 且稳定性与可控性均受到很大程度的限制^[6-8]; 当采用速度-位姿协同调控的多主多从(MMMS)控制构架^[9]对机器人进行协同遥控操作时, 一方面操作者通过对机器人位姿的控制改变机器人的实时重心, 使机器人能更好的适应地形的变化, 另一方面可以根据地形的平坦与复杂程度对机器人的行进速度进行调控, 速度与位姿的协同控制有效的提升机器人的稳定性, 此控制构架相较于单主单从控制构架更能满足机器人在复杂地形下的需求^[10]。但是如何协调操作者之间的操作任务, 高效解决操作过程中机器人可能出现的如稳定裕度不足、系统跟踪性差等状况仍然是较难解决的问题。

共享控制的遥控操作控制方法在近年来远程医疗的外科手术训练与教学中首先得到研究^[11], 并以通过在空间操控与远程医疗等方面的应用验证了其可行性^[12-13]。国内外均对共享控制进行了一系列的研究, Sheridan^[14]将共享控制方法引入机器人领域, 将机器人的不同自由度分别由手动和自动方式进行控制; Khademian 等^[15]提出一种包含从手反馈信息的共享控制方法, 通过在系统中引入共享因子使主手与从手之间力和速度信息实现共享, 由此形成了共享控制的基本结构, 并对四通道结构下主从手作用力和位置共享情况的系统运动学特征进行了研究^[16]; Papanikolopoulos^[17]提出了一种基于共享控制的遥控操作方法, 通过综合手动控制和自动控制解决了操作者与从端机器人视觉跟踪和伺服模块的集成问题; Sun 等^[18]建立一种新型的共享控制多边遥控操作系统, 使用两个主端机器人对机械手进行协同控制, 通过提出的一种变权重的 NFTSM 方法, 使系统具有快速定位及力跟踪能力, 增进了操作者对远端环境的临场感。

在面向户外复杂地形下的六足机器人遥控操作任务中, 单主单从控制系统不能保证机器人的稳定性与可通过性; 多主多从控制系统虽然能够满足机器人在复杂地形下的控制需求, 但系统的跟踪性无法得到保证, 且反馈至操作者的触觉力只起到反映控制误差的作用, 无法针对机器人的稳定性对操作者进行引导。针对复杂地形下的六足机器人遥控操作问题, 本文提出一种基于共享控制的六足机器人协同遥控操作方法。通过稳定裕度来反映机器人在复杂地形下的状态, 建立模糊推理器, 在操作过程中将机器人的稳定裕度转换为速度-位姿两操作子系统的控制权重, 一方面将操作者的控制指令进行合理的分配作为机器人的期望状态, 另一方面反馈至操作者的触觉力受到共享因子的影响, 其在控制误差的基础上将机器人的控制需求反馈至操作者, 指导操作者进行控制信

息的迭代, 实现共享操作, 从而使操作者能够更有效率的满足六足机器人在复杂地形下工作时对稳定裕度的需求, 并保证系统的稳定性。

1 六足机器人遥控操作系统

1.1 六足机器人构型

本文使用六足机器人作为遥控操作系统的从端, 其总体结构如图1所示。

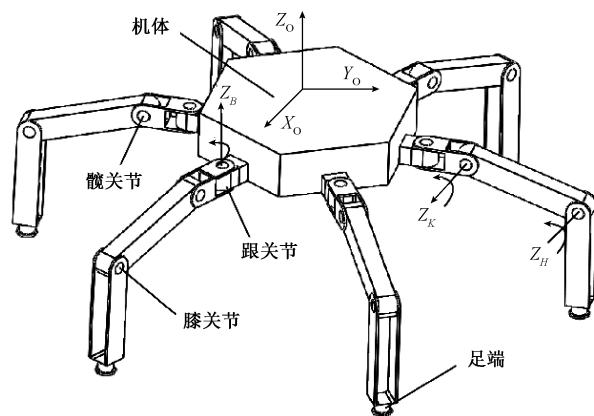


图1 六足机器人总体构型

Fig.1 Overall structure of hexapod robot

机器人由机体以及6条腿组成, 机体呈六边形结构, 6条腿分布在机体外侧。每条腿的结构均相同, 都具有3个自由度, 其中跟关节为旋转关节, 连接机体与基节; 髌关节为一级俯仰关节, 连接基节与大腿; 膝关节为二级俯仰关节, 连接大腿与小腿; 跟关节、髌关节、膝关节转角分别为 α 、 β 、 γ 。基节长度为 L_1 , 大腿长度为 L_2 , 小腿长度为 L_3 。

定义 $\sum G - X_g Y_g Z_g$ 为世界坐标系, $\sum O - X_o Y_o Z_o$ 为机体系坐标系, $\sum B - X_b Y_b Z_b$ 为跟关节坐标系, $\sum H - X_h Y_h Z_h$ 为髌关节坐标系, $\sum K - X_k Y_k Z_k$ 为膝关节坐标系, $\sum F - X_f Y_f Z_f$ 为足端坐标系。

1.2 遥控操作系统构架设计

在本系统中, 两操作者通过对应的主端机器人分别对机器人的速度与机体位姿进行控制。为了更高效地协调操作者之间的操作任务, 本文设计了一种面向六足机器人控制权重分配的模糊推理器, 通过传感器得到机器人在行进时的足端位置以及机体重心位置, 通过数据计算机器人的稳定裕度, 模糊推理器通过指定的模糊规则对其进行分析, 进而对各操作者的控制权重进行分配。当稳定裕度较高时, 速度层的控制者将获得更高的控制

权重,此时操作者能够更有效率的对机器人速度进行调整;当稳定裕度较低时,位姿层得控制者获得较高的控制权重,此时机器人机体得控制将会更为灵活,机体对地面的适应能力变得更强。

为了在保证六足机器人稳定性的前提下尽可能提高机器人的行走效率,本文选择三角步态作为遥操作过程中机器人的运动步态。考虑到从端机器人行进速度缓慢,且操作者与机器人间距离较近,因此时延现象对操作过程产生的影响较弱^[19],所以本文所设计的控制系统不对时延问题进行考虑。

2 主/从端机器人建模

在速度层操控系统中,主/从端机器人数学模型如下^[20]:

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{cm1} + \mathbf{F}_{h1} = \mathbf{M}_{m1} \ddot{\mathbf{q}}_{m1} + \mathbf{B}_{m1} \dot{\mathbf{q}}_{m1} \\ \boldsymbol{\delta}_u = \mathbf{F}_{cs1} - \mathbf{v}_s \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \mathbf{F}_{cm2} + \mathbf{F}_{h2} = \mathbf{M}_{m2} \ddot{\mathbf{X}}_m + \mathbf{B}_{m2} \dot{\mathbf{X}}_m \\ \mathbf{F}_{cs2} + \mathbf{F}_{e2} = \mathbf{M}_{s2} \ddot{\mathbf{p}}_s \end{cases} \quad (2)$$

其中式(1)、(2)分别为速度层、位姿层操控系统主从端机器人模型。这里 $\mathbf{F}_{cm1}$ 、 $\mathbf{F}_{cm2}$ 与 $\mathbf{F}_{cs1}$ 、 $\mathbf{F}_{cs2}$ 分别表示反馈给主端机器人与从端机器人的控制信号; $\boldsymbol{\delta}_u$ 代表造成系统出现机体速度差异的等效作用力; $\mathbf{F}_{h2} = [\mathbf{F}_{h2x} \ \mathbf{F}_{h2y} \ \mathbf{F}_{h2z}]^T$ 代表操作者与位姿层主端机器人之间的接触力的向量; $\mathbf{F}_{e1}$ 、 $\mathbf{F}_{e2} = [\mathbf{F}_{e2x} \ \mathbf{F}_{e2y} \ \mathbf{F}_{e2z}]^T$ 代表从端机器人与其接触的环境之间的力的向量; $\mathbf{M}_{m2}$ 及 $\mathbf{M}_s$ 分别代表位姿层主端机器人及从端机器人的质量;式中 $\mathbf{B}_{m1}$ 、 $\mathbf{B}_{m2}$ 则分别代表主端机器人的阻尼系数; $\mathbf{q}_{m1}$ 、 $\mathbf{X}_m = [\mathbf{X}_x \ \mathbf{X}_y \ \mathbf{X}_z]^T$ 代表位置指令; $\mathbf{v}_s$ 代表从端机器人速度; $\mathbf{p}_s = [p_r \ p_p \ p_z]^T$ 代表从端机器人机体俯仰角度、翻滚角度及机体高度。

由文献[21]可知,为了解决主端机器人位置与从端机器人速度之间的匹配问题,需要在速度层主端机器人原动态方程中引入新的控制变量:

$$\mathbf{r}_m = \mathbf{q}_{m1} + \lambda \dot{\mathbf{q}}_{m1} \quad (3)$$

式中: $0 < \lambda < 1$,为此而设计的新的局部控制律 $\mathbf{F}_{cm1} = \mathbf{F}_{cm1}^* + \bar{\mathbf{F}}_{cm1}$ 。其中 $\mathbf{F}_{cm1}^*$ 、 $\bar{\mathbf{F}}_{cm1}$ 分别为速度层主端机器人的局部控制律以及在整个操作系统中的全局控制率,且 $\mathbf{F}_{cm1}^* = -\dot{\mathbf{M}}_{m1} \dot{\mathbf{q}}_{m1} - \dot{\mathbf{B}}_{m1} \mathbf{q}_{m1}$ 。综上所述,速度层主端机器人的动力学模型被修正为:

$$\bar{\mathbf{M}}_{m1} \dot{\mathbf{r}}_m + \bar{\mathbf{B}}_{m1} \mathbf{r}_m = \bar{\mathbf{F}}_{cm1} + \mathbf{F}_{h1} \quad (4)$$

其中 $\bar{\mathbf{M}}_{m1} = \mathbf{M}/\lambda$, $\bar{\mathbf{M}}_{m1} = \mathbf{M}_{m1}/\lambda + \lambda \dot{\mathbf{B}}_{m1} - \mathbf{B}_{m1}$, $\bar{\mathbf{B}}_{m1} = \dot{\mathbf{B}}_{m1}$ 。

3 共享控制系统设计

3.1 六足机器人失稳判定

在复杂环境下,地形对六足机器人的运动稳定性具有很大的影响。如图2所示,在凹凸地形下,机器人由于足端位置无法达到预定目标,或由于机器人脚力的分布不均等情况均会对机器人的稳定性造成威胁,造成机器人失稳,甚至倾翻^[22]。倾翻的发生往往是不可逆转的,因此需要在倾翻发生前采取措施来避免,通常操作者采用减小机器人的运动速度同时调整机体重心位置的控制方法使机器人远离倾翻临界,以满足机器人对稳定裕度的调控需求,从而避免倾翻失稳发生。

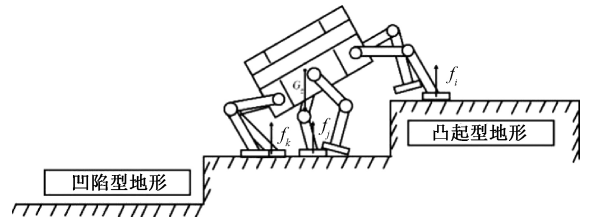


图2 凹凸地形示意图

Fig.2 Schematic diagram of concave-convex topography

综上所述,本文采用零力矩点法(zero moment point, ZMP)作为判断机器人稳定状况的根据,其优点在于利用达朗伯原理将扰动等效至质心位置,适合对复杂地形下机器人进行稳定分析。ZMP即水平面上X、Y方向上的力矩为零的零力矩点至支撑多边形投影各边距离中的最小值,如图3所示。

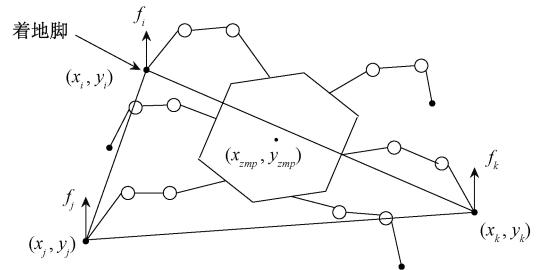


图3 ZMP示意图

Fig.3 Schematic diagram of ZMP

设零力矩点的坐标表示为 (x_{zmp}, y_{zmp}) , f_i 为第 i 号着地腿在竖直方向上的脚力分量,计算方法为:

$$\begin{cases} x_{zmp} = \frac{x_i f_i + x_j f_j + x_k f_k}{f_i + f_j + f_k} \\ y_{zmp} = \frac{y_i f_i + y_j f_j + y_k f_k}{f_i + f_j + f_k} \end{cases} \quad (5)$$

ZMP 点到支撑多边形的最小距离即为此刻机器人的 ZMP 稳定裕度。

3.2 基于 ZMP 的共享因子模糊推理器

共享控制权重的分配是共享控制的研究热点之一,本文将六足机器人稳定裕度引入共享控制框架,设计了以稳定裕度与稳定裕度变化率为输入,共享因子为输出的模糊控制器,通过共享因子对操作者的控制权重进行合理的分配,同时通过双向控制将操作构成中产生的误差反馈至操作者,增加操作者的临场感。当采用固定数值的共享因子时,系统的控制权重将始终偏向于较大的一方,操作者的控制权重不能得到合理的分配,因此系统会产生一个固定数值的误差,导致触觉力将长时间为单方向力,无法将机器人的控制需求反馈至操作者,失去了指导功能。因此本文中的共享因子定义为 $\alpha \in [0,1]$,其中 α 为速度层操作者的控制权重, $(1-\alpha)$ 为位姿层操作者得控制权重。共享因子调整规则具体如下:

1) 当机器人在平坦地形时,机体处于稳定状态,机器人位姿不需要受到过多位姿干预,操作者只需着重对机体速度进行操控,此时 $\alpha = 1$ 。

2) 当机器人在复杂地形时,机体倾翻程度过大,操作者需要立即停止机器人运动,同时调节机体位姿以适应当前地形的变化,防止机器人稳定状况进一步恶化,此时 $\alpha = 0$ 。

3) 当机器人处于复杂地形时,机体随不规则地形产生波动,模糊控制器根据 ZMP 稳定判据得出的 S_{ZMP} 对共享因子进行调整:当 S_{ZMP} 逐渐趋于失稳时,控制权重向位姿层操作者偏移,使其可以更有效率的调整机体位姿,位姿层主端机器人输出推力,指导位姿层操作者进行控制;同时由于速度层的控制权重降低,速度层主端机器人输出拉力,使操作者控制机器人进入减速状态。当机器人处于稳定状态时,控制权重向速度层操控者发生偏移,速度层主端机器人输出推力鼓励操作者对机器人速度进行进一步控制,同时位姿层主端机器人输出拉力,防止操作者对机器人位姿进行更多不必要的干涉,此阶段中 $\alpha \in (0,1)$ 。

通过建立稳定裕度与共享因子间精确的数学模型,将各种影响的因素都包含进来,从而得到每一个 S_{ZMP} 所对应的优势因子 α 是十分困难的。本文通过建立以稳定裕度 S_{ZMP} 和稳定裕度变化率 SC_{ZMP} 作为输入,以优势因子 α 作为输出的模糊推理器,从而获得各个时刻机器人状况与操作系统控制权重的关系。

由于本系统是为保护机器人的稳定性,因此不考虑 $S_{ZMP} < 0$ 时的情况,模糊推理系统的输入 S_{ZMP} 以及输出 α 均采用 4 段模糊子集 {零,正小,正中,正大} 描述,记为 {ZO,PS,PM,PB},论域划分为 $S_{ZMP} = \{0,0.2,0.4,0.6,0.8,1\}$, $\alpha = \{0,0.2,0.4,0.6,0.8,1\}$ 。 SC_{ZMP} 采用 7 段模

糊子集 {负大,负中,负小,零,正小,正中,正大},记为 {NB,NM,NS,ZO,PS,PM,PB},论域划分为 $SC_{ZMP} = \{-3,-2,-1,0,+1,+2,+3\}$,考虑到对论域的覆盖程度和灵敏度与稳定性,各模糊子集选用三角形隶属度函数^[23],依据上述调整方案,建立模糊控制规则表如表 1 所示。

表 1 优势因子 α 的模糊规则表

Table 1 The fuzzy rule table of dominance factor α

SC_{ZMP}	S_{ZMP}			
	ZO	PS	PM	PB
NB	PM	PM	PS	ZO
NM	PM	PM	PS	ZO
NS	ZO	PS	ZO	PS
ZO	NS	ZO	NS	NS
PS	NS	NS	NM	NM
PM	NM	NM	NM	NB
PB	NM	NB	NB	NBV

模糊推理器采用 Mamdani 型推理算法和加权平均法进行模糊推理计算和去模糊化,以控制量论域中的每个元素 $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 作为带判决输出模糊集合的隶属度 $\mu(i)$ 的加权系数,取乘积 $x_i \mu(i)$,再计算该乘积的和对于隶属度和的平均值 x_0 ,平均值 x_0 便是应用加权平均法模糊集合求得的结果,即:

$$x_0 = \frac{\sum_{i=1}^n x_i \mu(i)}{\sum_{i=1}^n \mu(i)} \quad (6)$$

3.3 共享控制遥操作系统控制算法设计

两个操作者(或一个操作者的两个手)分别控制两个主端机器人发送控制指令 r_m, X_m ,指令由 PD 控制器及优势因子的控制权重分配后作为机器人的期望速度 v_m 及期望位姿 $p_m = [p_{mx} \ p_{my} \ p_{mz}]^T$,机器人通过跟踪期望值零得到实际速度 v_s 及位姿 $p_s = [p_r \ p_y \ p_z]^T$,系统结构如图 4 所示。

遥操作系统的控制器表达式如下:

$$\begin{cases} F_{cm} = \begin{bmatrix} F_{cmv} \\ F_{cmr} \\ F_{cmp} \\ F_{cmz} \end{bmatrix} = -C_m \begin{bmatrix} r_m(t) - v_s(t) \\ X_x(t) - p_r(t) \\ X_y(t) - p_p(t) \\ X_z(t) - p_z(t) \end{bmatrix} \\ F_{cs} = \begin{bmatrix} F_{csv} \\ F_{csr} \\ F_{csp} \\ F_{csz} \end{bmatrix} = C_s \begin{bmatrix} r_m(t) - v_s(t) \\ X_x(t) - p_r(t) \\ X_y(t) - p_p(t) \\ X_z(t) - p_z(t) \end{bmatrix} H \end{cases} \quad (7)$$

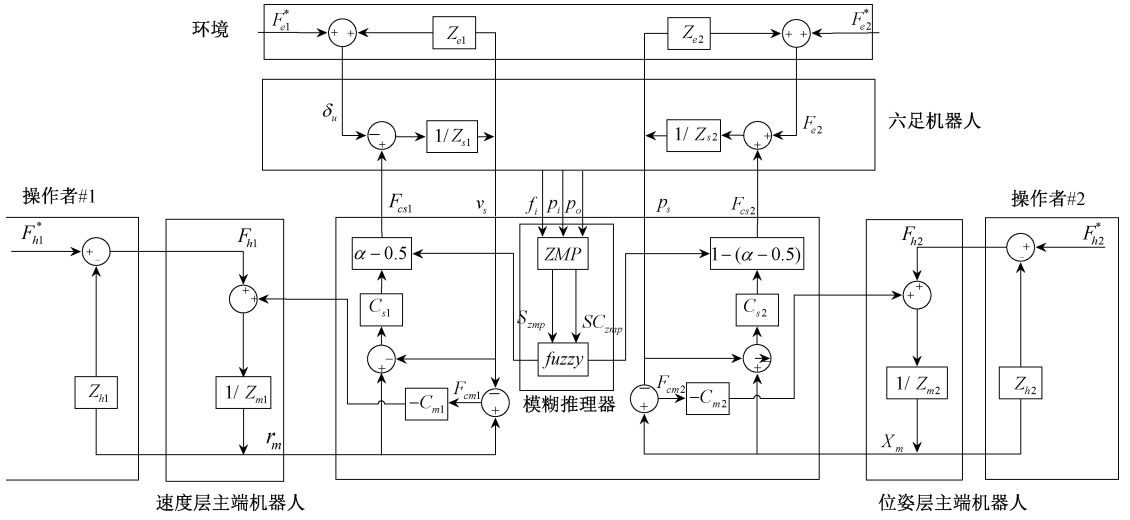


图4 控制系统

Fig.4 The control system block diagram

式中: C_m 、 C_s 代表各主端和从端机器人的 PD 控制器, 其中

$$C_i = \begin{bmatrix} D_{iiv} + \frac{k_{iiv}}{s} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & D_{irr} + \frac{k_{irr}}{s} & D_{irp} + \frac{k_{irp}}{s} & D_{irz} + \frac{k_{irz}}{s} \\ 0 & D_{irp} + \frac{k_{irp}}{s} & D_{ipp} + \frac{k_{ipp}}{s} & D_{ipz} + \frac{k_{ipz}}{s} \\ 0 & D_{irz} + \frac{k_{irz}}{s} & D_{ipz} + \frac{k_{ipz}}{s} & D_{izz} + \frac{k_{izz}}{s} \end{bmatrix} \quad (i = m, s) \quad (8)$$

$H = \text{diag}[(\alpha - 0.5) \quad 1 - (\alpha - 0.5) \quad 1 - (\alpha - 0.5) \quad 1 - (\alpha - 0.5)]^T$ 表示系统通过共享因子分配各个操作子系统的控制权重。本系统的阻抗矩阵表示为:

$$\begin{bmatrix} F_h \\ F_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_m + C_m & -C_m \\ -C_s & Z_s + C_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & H \\ 1 & H \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tau_m \\ \tau_s \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: $F_h = [F_{h1} \quad F_{h2x} \quad F_{h2y} \quad F_{h2z}]^T$ 表示主端机器人与操作者之间的作用力, $F_e = [F_{e1} \quad F_{e2r} \quad F_{e2p} \quad F_{e2z}]^T$ 表示机器人受到的环境影响力; $\tau_m = [r_m \quad \dot{X}_x \quad \dot{X}_y \quad \dot{X}_z]^T$ 表示操作者的控制指令; $\tau_s = [v_s \quad \dot{p}_r \quad \dot{p}_p \quad \dot{p}_z]^T$ 代表机器人的实际速度与实际平台位姿变化速度; $Z_s = \text{diag}[1 \quad M_{s2}s]$ 与 $Z_m = \text{diag}[M_{m1}s + B_{m1} \quad M_{m2}s + B_{m2}]$, 分别代表从端机器人与主端机器人的阻抗矩阵。

为了获得对期望速度和期望位置更好的跟踪效果并保证系统的稳定性, 根据忽略的理想条件下的多主机/单从机多自由度遥操作系统绝对稳定性定理^[24], 对控制器中的具体参数进行选择:

$$\begin{cases} \frac{D_{mrr}}{k_{mrr}} = \frac{D_{srr}}{k_{srr}}, \frac{D_{mpp}}{k_{mpp}} = \frac{D_{spp}}{k_{spp}}, \frac{D_{mzz}}{k_{mzz}} = \frac{D_{szz}}{k_{szz}}; \\ \frac{k_{mrr}}{k_{srr}} = \frac{k_{mrp}}{k_{srp}} = \frac{k_{mrz}}{k_{srz}} = \frac{k_{mpp}}{k_{spp}} = \frac{k_{mpz}}{k_{spz}} = \frac{k_{mzz}}{k_{szz}}; \\ k_{irr}k_{ipp} \geq k_{irp}^2, k_{irr}k_{izz} \geq k_{irz}^2, k_{ipp}k_{izz} \geq k_{ipz}^2; \\ D_{irr}D_{ipp} \geq D_{irp}^2, D_{irr}D_{izz} \geq D_{irz}^2, D_{ipp}D_{izz} \geq D_{ipz}^2 \end{cases} \quad (i = m, s) \quad (10)$$

控制器中各控制参数均大于等于零。由于优势因子 α 不影响阻抗矩阵的对称性且其取值恒大于等于零, 则对于任意 $\alpha \in [0, 1]$ 本系统始终保持稳定。

4 实验验证

本文设置了一系列实验验证提出的共享控制协同遥操作方法的有效性, 实验中通过主端机器人采集遥操作者的操作指令, 主端控制器将操作者的控制意图量化为控制指令, 控制指令经过权重分配后生成从端机器人的期望速度、位姿, 从端机器人的底层控制器以此指令为目进行运动规划, 生成机器人的实际速度、位姿, 主端机器人通过内部的电机以触觉力的形式将操作者的控制指令于机器人的实际运动状态之间的差值反馈至操作者, 引导操作者对后续控制进行迭代。实验系统框图如图5所示。

4.1 实验环境

实验中选用 3-DOF 自由度关节型触觉力反馈设备 PHANTOM Omni 作为遥操作系统速度层主端机器人, 3-DOF 并联型触觉力反馈设备 Novint Falcon 作为遥操作系统位姿层主端机器人。两主端机器人用于量化操作者

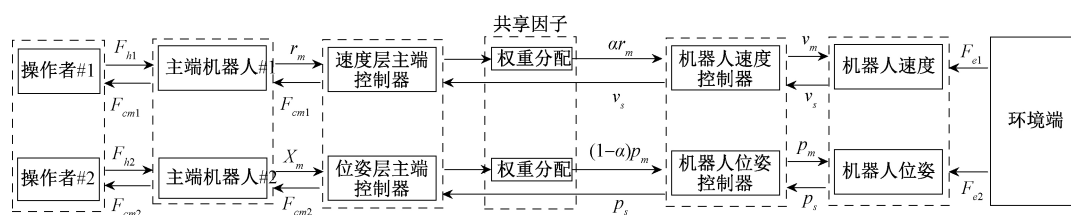


图5 实验系统

Fig.5 The experiment system block diagram

对于从端机器人的操作意图。用于实验的遥操作平台如图6所示。

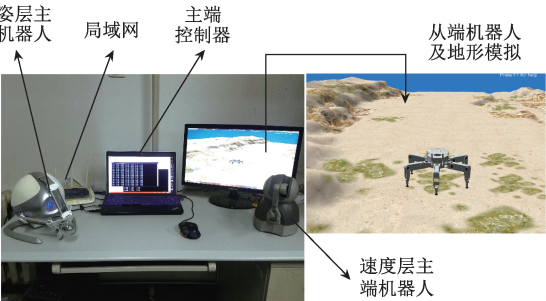


图6 实验系统图

Fig.6 Photo of the experiment system

实验使用 Vortex (CMLabs, Montreal, Canada) 多体力学实时虚拟仿真平台开发一套具备较高保真度的六足机器人及接触环境的仿真模型,整个仿真系统包括了机器人本体模型模块、地形创建模块、视景仿真模块、通信模块、运动控制模块、足-地接触力学求解模块及运动学和动力学求解模块。将所开发的各个模块集成,借助 Vortex 仿真软件中的丰富功能,并加入环境建模和视景仿真技术,以实现包含六足机器人及环境视景的实时虚拟仿真系统。本文搭建的半物理仿真实验平台如图所示,实验中的地形为由 Vortex 生成的崎岖地形,地形尺寸为 50 m(x) $\times$ 50 m(y),地形主要分为 3 个部分,分别为用于机器人起步的平坦地形,验证机器人稳定性及系统可行性的坡面地形及凹凸地形。

4.2 实验设计

设计了 3 组实验对本文提出的基于共享控制的六足机器人协同要操作控制方法进行验证。

- 1) 操作者分别通过速度-位姿协同控制系统与共享控制系统对六足机器人进行控制,验证系统的可行性;
- 2) 操作者分别采用控制权重为定值,且分别偏向于速度层操控 ($\alpha = 0.3$) 及控制权重偏向于位姿层操控 ($\alpha = 0.7$) 的系统与 α 随稳定裕度变化的系统对六足机器人进行控制,验证 α 为时变参数的必要性;
- 3) 操作者分别以如表 2 所示的控制律参数对六足机器人进行控制。

表 2 操控系统控制律参数

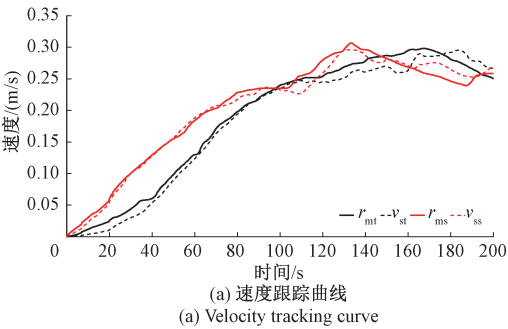
Table 2 The control law parameters of control system					
主端	Case I	Case II	从端	Case I	Case II
k_{mv}	30	40	k_{sv}	30	50
k_{mr}	40	55	k_{sr}	40	55
k_{mp}	30	40	k_{sp}	30	20
k_{mrz}	30	50	k_{srz}	30	45
k_{mpp}	40	35	k_{spp}	40	35
k_{mpz}	20	45	k_{spz}	20	55
k_{mzz}	40	30	k_{szz}	40	40
D_{mv}	40	20	D_{sv}	40	30
D_{mr}	50	35	D_{sr}	50	45
D_{mp}	40	50	D_{sp}	40	60
D_{mrz}	40	35	D_{srz}	40	35
D_{mpp}	50	50	D_{spp}	50	40
D_{mpz}	30	45	D_{spz}	30	45
D_{mzz}	50	40	D_{szz}	50	30

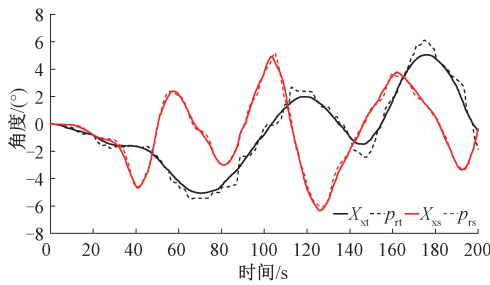
表中的 Case I 中的参数满足绝对稳定条件,相对的 Case II 中的参数则不满足,操作者通过具有两组不同的控制律参数的控制系统对六足机器人进行控制,以验证控制参数对系统跟踪性能的影响。

4.3 结果分析

1) 共享控制与速度位姿协同控制的对比实验

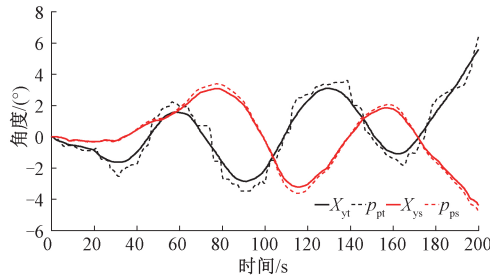
操作者分别以传统的速度-位姿协同控制系统与控制参数为 Case I 的共享控制系统对复杂地形下的六足机器人进行控制。实验结果如图 7 所示。





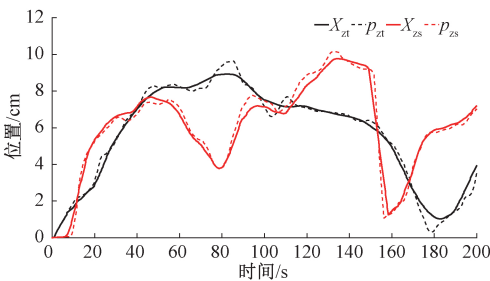
(b) 翻滚角跟踪曲线

(b) Roll angle tracking curve



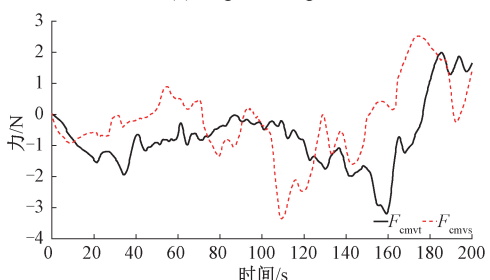
(c) 俯仰角跟踪曲线

(c) Pitch angle tracking curve



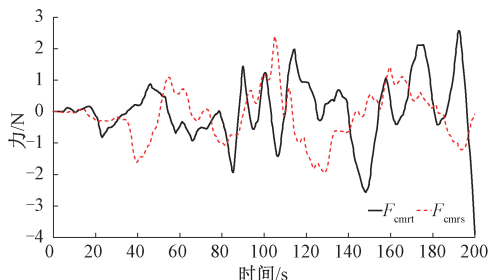
(d) 高度跟踪曲线

(d) Height tracking curve



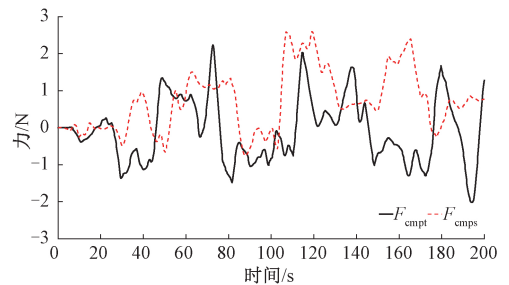
(e) 速度跟踪力反馈曲线

(e) Force feedback curve of velocity tracking



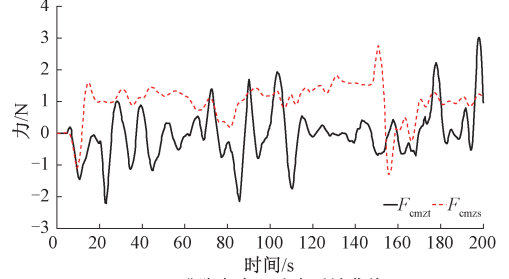
(f) 翻滚角跟踪力反馈曲线

(f) Force feedback curve of roll angle tracking



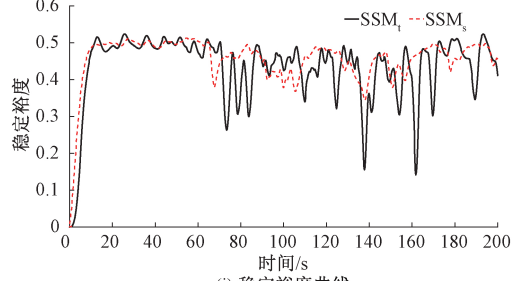
(g) 俯仰角跟踪力反馈曲线

(g) Force feedback curve of pitch angle tracking



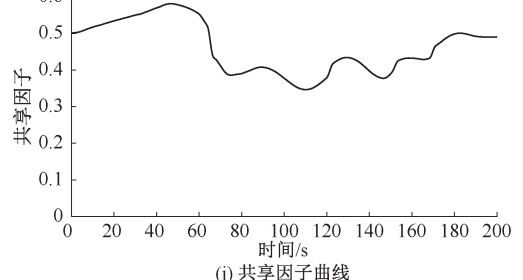
(h) 升降高度跟踪力反馈曲线

(h) Force feedback curve of height tracking



(i) 稳定裕度曲线

(i) Stability margin curve



(j) 共享因子曲线

(j) Sharing factor curve

图 7 使用 Case I 控制参数的速度-位姿协同控制与共享控制实验结果

Fig.7 Experiment results of velocity-posture cooperative control and shared control with Case I parameters

图 7 中下标为 t 的曲线代表操作者由协同控制系统对机器人进行控制得到的实验结果,下标为 s 的曲线代表操作者由共享控制系统对机器人进行控制得到的实验结果。图 7(a)~(d)表明,机器人在复杂地形下,来自外界的扰动会导致系统的跟踪性降低。机器人在 0~63 s 间由平坦地形起步,机器人具有良好的稳定性;在 63~132 s 间,机器人在具有坡度的地形下行进,由于地面的

变化导致其速度-位姿的跟踪性能下降;后在 132~200 s 间机器人运动于凹凸地形上,外界扰动导致机器人出现

了较大的误差,两系统的跟踪性与稳定性比较如表 3 所示。

表 3 系统性能比较
Table 3 System performance comparison

系统类型	实验结果				
	速度跟踪误差/(m/s)	翻滚角跟踪误差/(°)	俯仰角跟踪误差/(°)	升降跟踪误差/cm	稳定裕度变化范围
协同控制	[-0.021 ,0.034]	[-1.056 ,0.932]	[-0.979 ,0.871]	V-0.814 ,0.771]	[0.157 ,0.525]
共享控制	[-0.017 ,0.025]	[-0.538 ,0.377]	[-0.382 ,0.241]	[-0.416 ,0.302]	[0.348 ,0.501]

由图 7 与表 3 可以看出,相较于传统的速度-位姿协同控制系统,共享控制系统下的六足机器人具有更小的跟踪误差变化范围及误差极限值,跟踪曲线的波动较小,其跟踪性更为稳定;由图 7(e)~(h) 中协同控制系统相关实验数据可以看出,由于系统的跟踪效果不稳定,导致操作者与主端机器人之间的作用力波动很大,而共享控制系统相关数据表明,由于共享控制系统对操作者的控制权重进行了合理的分配,系统的跟踪性得到了保障,使得触觉力反馈的波动较小,能够更有效地指导操作者保持系统的跟踪能力;由图 7(j) 可以发现,本实验中共享因子的变化范围为[0.34,0.58],当其在此范围内变化时,控制系统能够产生稳定的控制效果,系统的误差较小,触觉力反馈系统可以完成辅助操作者的任务,且由图 7(i) 可知,相较于传统的速度-位姿协同控制,通过共享控制操作的机器人能够更有效地维持稳定性,稳定裕度的波动在相对平坦地形下的平均值能够位置在 0.5 左右,在复杂地形下的波动较小并能维持在[0.348,0.501] 范围内,而在传统的协同控制下,机器人在复杂地形下的波动范围在[0.157,0.525] 范围内。

图 7 中共享控制系统的相关实验数据表明,当六足机器人在复杂地形下行进时,机器人稳定裕度由于受到不规则地形影响而不断变化时,共享因子的数值也会随之产生一系列改变:

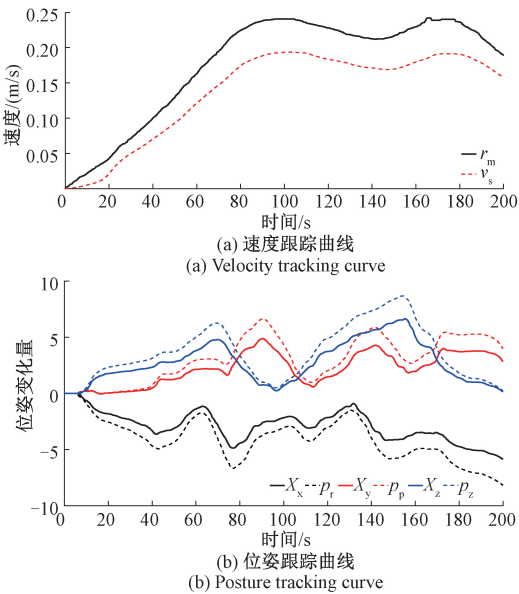
(1) 在实验前 60 s 中,六足机器人处于相对平坦地形下,机器人能够保持一个良好的平衡状态。此时共享因子逐渐增大,控制权重向速度层操作者方偏移,通过图 7(a)~(d) 可以发现六足机器人的实际速度逐渐超越操作者的控制指令,共享因子从基值 0.5 开始增加,另一方面位姿层操作者对于机器人位姿的控制权重随着控制权重的偏移而逐渐减小;图 7(e)~(h) 的变化表明在此时间段内速度层主端机器人逐渐产生推力,意在鼓励操作者更积极地对六足机器人的速度进行控制,另一方面位姿层主端机器人则产生了相应的拉力,防止操作者继续对机器人的机体位姿进行更多不必要的调整。

(2) 在实验的 60~200 s 中,六足机器人开始在复杂地形中进行移动,当六足机器人的稳定裕度降低时,通过图

7(j) 可以看出,共享因子逐渐减小,控制权重逐渐向位姿层操作者方偏移,由图 7(a)~(d) 可以看出速度层控制者虽然没有给出减速的控制指令,但是由于控制权重的变化,六足机器人的实际速度逐渐减慢,作用在于通过减慢机器人的行进速度为机器人的机体争取更多时间进行调整,恢复机器人的稳定性,另一方面位姿层操作者对于机体俯仰角、翻滚角及机体高度的控制变得更为灵活,使操作者能够快速通过调整机体位姿应对地面的变化;图 7(e)~(h) 的变化说明此时的速度层主端机器人产生一股拉力,意在阻止操作者在机器人稳定裕度降低时继续加速,另一方面位姿层主端机器人相应的产生了一股推力,鼓励并辅助操作者对位姿进行调整。机器人在操作者的一系列操作后,其稳定裕度将呈现趋于稳定的变化,此时共享因子的变化对遥操作系统的影响与(1) 相同。

2) 共享控制中共享因子为定常参数与时变参数的对比实验

首先,操作者以共享因子倾向于位姿层操作者($\alpha=0.3$) 的控制系统对机器人进行控制,此时操作者对机器人的与位姿控制相对灵活,对速度的控制能力减弱,且始终受到速度层主端机器人的触觉力反馈阻碍,实验结果如图 8 所示。



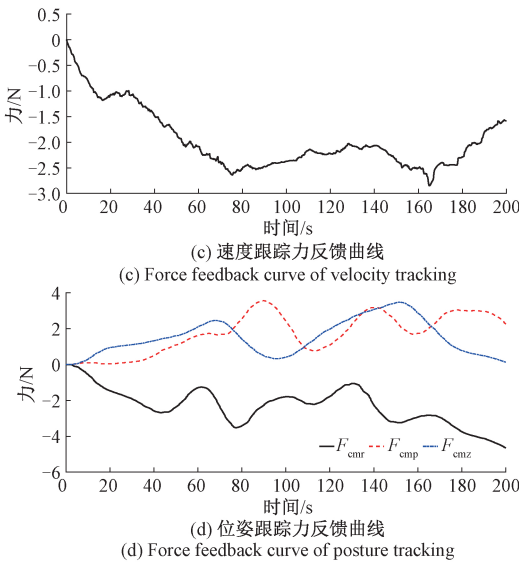


图 8 共享控制($\alpha=0.3$)实验结果

Fig.8 Experiment results of shared control ($\alpha=0.3$)

然后,操作者以共享因子倾向于速度层操作者($\alpha=0.7$)的控制系统对机器人进行控制,此时操作者可以更灵活的控制机器人的速度,对位姿的控制能力减弱,实验结果如图 9 所示。

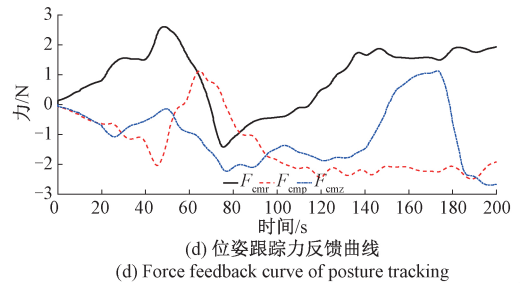
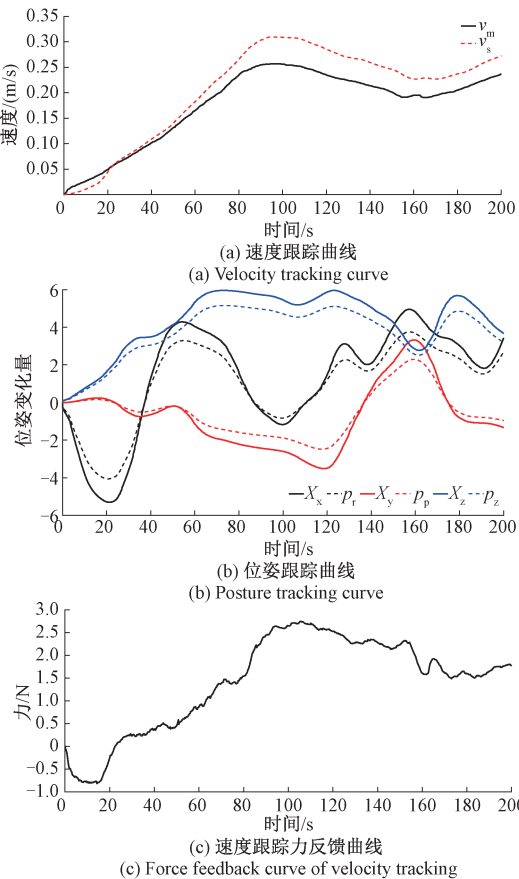


图 9 共享控制($\alpha=0.7$)实验结果

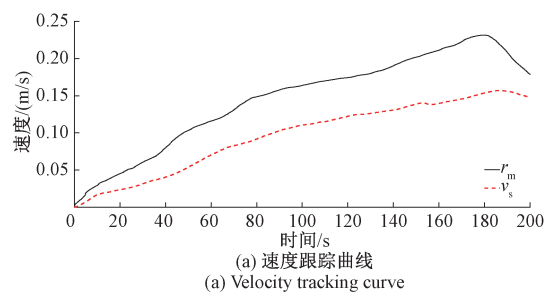
Fig.9 Experiment results of shared control($\alpha=0.7$)

实验表明,当共享因子为一具体定值时,控制系统的控制权重将持续偏向某一操作者,系统无法保持良好的跟踪效果:图 8(a)和(b)表示当控制权重偏向于位姿层控制者时,机器人实际速度将低于操作者的速度指令,在 95 s 速度指令达到最大值,具体值为 0.28 m/s,此时速度误差为 0.05 m/s,机器人实际位姿的变化则大于操作者的位置指令,位置误差为-0.7 cm;图 9(a)和(b)表示当控制权重偏向于速度层控制者时,机器人实际速度将大于操作者的速度指令,在 100 s 时速度指令达到最大值,具体值为 0.25 m/s,此时速度误差为-0.6 m/s,机器人实际位姿的变化幅度则小于操作者的速度指令,位置误差为 0.5 cm。通过图 8(c)、图 8(d)、图 9(c)和图 9(d)可以看出,由于控制权重为定值导致机器人的实际状态与操作者的控制指令存在一个固定数值内的误差,误差的存在导致各主端机器人产生的触觉力为长时间的单方向力,无法正确反馈机器人的实际状态,使系统失去了对操作者进行指导的效果。

通过本组实验与图 7 中的实验数据进行对比,可以发现采用根据机器人稳定状态而变化的共享因子能够合理的对操作者的控制权重进行分配,且触觉力能够有效的对操作者进行引导。

3) 共享控制中控制参数满足绝对稳定条件与否的对比实验

最后验证控制律参数对系统跟踪性能的影响,操作者采用以 Case II 中的控制参数构成的系统对机器人进行控制,实验结果如图 10 所示。



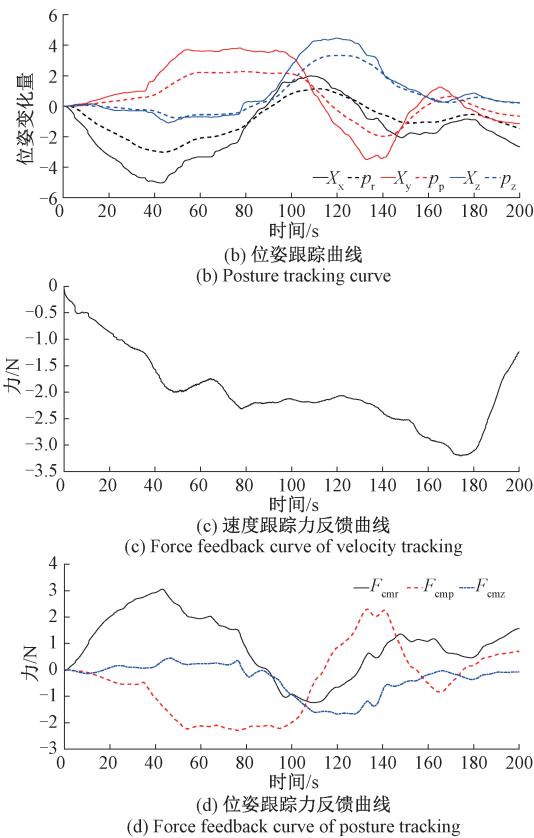


图 10 使用 Case II 控制参数的共享控制实验结果
Fig.10 Experiment results of shared control with Case II parameters

首先,通过对比图 7 中共享控制系统速度与位姿跟踪情况与 10(a)和图 10(b)可以看出,当采用满足绝对稳定条件的 Case I 中的参数时,系统能产生稳定的跟踪效果,而 Case II 中的参数不满足绝对稳定条件,导致系统的跟踪性能表现出了不稳定性且存在滞后的现象,在 180 s 时速度指令为最大值,具体指为 0.24 m/s,此时速度误差为 0.9 m/s,位置误差为 1 cm;其次,图 7 中的力反馈性能与图 10(c)和图 10(d)表明当采用满足绝对稳定条件的 Case I 中的参数时,主端机器人产生的触觉力能够更好地协助操作者进行控制指令的迭代,而采用不满足绝对稳定条件的 Case II 参数时,操作者感受到的力信息由于系统的跟踪性能差而无法正确的反映出机器人对各操作者的控制需求,主端机器人对于操作者的指导能力下降。

5 结 论

本文提出了一种基于共享控制的六足机器人协同遥操作方法。在此遥操作系统中,通过构建以机器人稳定

裕度为输入的共享因子模糊推理器得出机器人稳定性与操作者控制权重之间的关系,在主从端控制器中加入优势因子,实现操作者与六足机器人速度控制、位姿控制以及力反馈的闭环控制回路,通过时变共享因子的调节使速度层操作者与位姿层操作者对从端六足机器人具有更合理的控制权重,使操作者的控制能够更有效率地满足六足机器人在复杂地形下对稳定裕度的需求。通过实验可以看出,本文所提出的变权重的共享控制构架能够在保持跟踪性的前提下更好地维持机器人的稳定性,相较于速度-位姿协同控制下的六足机器人,其稳定裕度变化范围得到了明显的缩小,且稳定裕度的谷值提升了 0.191,系统的可行性得到了验证。

参考文献

[1] 刘逸群,邓宗全,刘振,等.液压驱动六足机器人一种低冲击运动规划方法[J].机械工程学报, 2015,51(3): 10-17.
LIU Y Q, DENG Z Q, LIU ZH, et al. Low-impact motion planning method of hydraulically actuated hexapod robot [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 10-17.

[2] 陈腾,李贻斌,荣学文.四足机器人动步态下实时足底力优化方法的设计与验证[J].机器人, 2019, 41(3): 307-316.
CHEN T, LI Y B, RONG X W. Design and verification of real-time plantar force optimization for quadruped robots in dynamic gait [J]. Robot, 2019, 41(3): 307-316.

[3] 李佳钰,尤波,丁亮,等.基于双向控制的六足机器人转向遥操作研究[J].仪器仪表学报, 2018, 39(3): 71-80.
LI J Y, YOU B, DING L, et al. Steering teleoperation of hexapod robot based on bilateral control [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018,39(3):71-80.

[4] YOU B, LI J, DING L, et al. Semi-autonomous bilateral teleoperation of hexapod robot based on haptic force feedback[J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2018,91(3-4):583-602.

[5] 李佳钰,尤波,许家忠,等.基于时域无源性控制的六足机器人双边触觉遥操作[J/OL].控制与决策: [2019-06-08]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0998>. DOI:10.13195/j.kzyjc.2018.0998

- LI J Y, YOU B, XU J ZH, et al. Bilateral haptic teleoperation of hexapod robot based on time-domain passivity control[J/OL]. Control and Decision: [2019-06-08]. <https://doi.org/10.13195/j.kzyjc.2018.0998>. DOI:10.13195/j.kzyjc.2018.0998
- [6] 丁希仑, 王志英, ALBERTO ROVETTA. 六边形对称分布六腿机器人的典型步态及其运动性能分析[J]. 机器人, 2010, 32(6): 759-765.
- DING X L, WANG ZH Y, ALBERTO ROVETTA. Typical gaits and motion analysis of a hexagonal symmetrical hexapod robot[J]. Robot, 2010, 32(6): 759-765.
- [7] DING X, YANG F. Study on hexapod robot manipulation using legs[J]. Robotica, 2016, 34(2): 468-481.
- [8] 徐坤, 丁希仑, 李可佳. 圆周对称分布六腿机器人三种典型行走步态步长及稳定性分析[J]. 机器人, 2012, 34(2): 231-241, 256.
- XU K, DING X L, LI K J. Stride size and stability analysis of a radially symmetrical hexapod robot in three typical gaits[J]. Robot, 2012, 34(2): 231-241, 256.
- [9] 李佳钰. 基于触觉力反馈的六足机器人双向操控技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2018.
- LI J Y. Research on bilateral operation of hexapod robot based on haptic force feedback[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2018.
- [10] YAMAGUCHI J, SOGA E, INOUE S, et al. Development of a bipedal humanoid robot-control method of whole body cooperative dynamic biped walking[C]. IEEE International Conference on Robotics & Automation, 1999: 368-374.
- [11] 鹿振宇, 黄攀峰, 戴沛. 面向空间遥操作的非对称双人共享控制及其性能分析[J]. 航空学报, 2016, 37(2): 648-661.
- LU ZH Y, HUANG P F, DAI P. Asymmetric dual-user shared control method and its performance analysis for space teleoperation[J]. Acta Aeronautica Et Astronautica Sinica, 2016, 37(2): 648-661.
- [12] GUPTA A, O'MALLEY M K. Design of a haptic arm exoskeleton for training and rehabilitation[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2006, 11(3): 280-289.
- [13] CARIGNAN C R, KREBS H I. Telerehabilitation robotics: Bright lights, big future? [J]. Journal of Rehabilitation Research & Development, 2006, 43(5): 695-710.
- [14] SHERIDAN T B. Space teleoperation through time delay: review and prognosis[J]. IEEE Transactions on Robotics and Automation, 1993, 9(5): 592-606.
- [15] KHADEMIAN B, HASHTRUDI-ZAAD K. A four-channel multilateral shared control architecture for dual-user teleoperation systems[C]. IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 2007: 2660-2666.
- [16] KHADEMIAN B, HASHTRUDI-ZAAD K. Dual-user teleoperation systems: new multilateral shared control architecture and kinesthetic performance measures[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2012, 17(5): 895-906.
- [17] PAPANIKOLOPOULOS N P, KHOSLA P K. Shared and traded telerobotic visual control[C]. IEEE International Conference on Robotic and Automation, 1992: 878-885.
- [18] SUN D, LIAO Q, GU X, et al. Multilateral teleoperation with new cooperative structure based on reconfigurable robots and type-2 fuzzy logic[J]. IEEE Transactions on Cybernetics, 2019, 49(8): 2845-2859.
- [19] YE Y, PAN Y, HILLIARD T. Bilateral teleoperation with time-varying delay: A communication channel passification approach[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(4): 1431-1434.
- [20] LI J Y, YOU B, DING L, et al. A novel bilateral haptic teleoperation approach for hexapod robot walking and manipulating with legs[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2018, 108: 1-12.
- [21] LI W, DING L, LIU ZH, et al. Kinematic bilateral tele-driving of wheeled mobile robots coupled with slippage[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(3): 2147-2157.
- [22] BELTER D, SKRZYPCZYŃSKI P. Rough terrain mapping and classification for foothold selection in a walking robot[J]. Journal of Field Robotics, 2011, 28(4): 497-528.
- [23] 张伟刚, 瞿少成, 秦天柱, 等. 高速公路隧道照明节

能模糊控制系统[J].电子测量与仪器学报, 2017, 31(12):2049-2055.

ZHANG W G, QU SH CH, QIN T Z, et al. Energy saving fuzzy control system for expressway tunnel lighting[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2017,31(12):2049-2055.

[24] 李坚. 多边触觉遥操作系统绝对稳定性研究[D].成都:电子科技大学,2014.

LI J. Absolute stability of multilateral haptic teleoperation systems[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2014.

作者简介



尤波(通信作者),1982 年于哈尔滨工业大学获得学士学位,1987 年于哈尔滨科技大学获得硕士学位,1995 年于哈尔滨工业大学获得博士学位,现为哈尔滨理工大学教授,主要研究方向为智能机器人与机电控制。

E-mail:youbo@hrbust.edu.cn

You Bo (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 1982, M. Sc. degrees from Harbin University of Science and Technology in 1988, and Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 1995. Now, he is a professor at Harbin University of Science and Technology. His main research interest includes intelligent robot and mechatronic control.



陈翰南,2017 年于石家庄铁道大学获得学士学位,现为哈尔滨理工大学硕士研究生,主要研究方向为足式机器人控制与人机交互技术。

E-mail:bdchenhn@sina.com

Chen Hannan received his B. Sc. degree from Shijiazhuang Tiedao University in 2017, and he is now a M. Sc. candidate in Harbin University of Science and Technology. His main research interest includes the legged robot control and human-machine interaction technique.